

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 662.7

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-4-50-59



## ВЕРОЯТНОСТЬ СОВМЕСТНОГО УЛАВЛИВАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ И ЛЕГКИХ ЧАСТИЦ В ОТСТОЙНИКЕ

Голованчиков А.Б., Залипаева О.А., Прохоренко Н.А., Меренцов Н.А.

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

**Аннотация.** Проводится физическое и математическое моделирование гравитационного разделения суспензий, у которых плотность тонкодисперсных частиц больше и меньше плотности сплошной жидкой фазы. Аналитически выводятся формулы для расчета локальных степеней очистки частиц, размеры которых больше или равны номинальному эквивалентному диаметру, то есть улавливаемых на 100%. Приводится пример расчета с определением зависимости общей степени очистки и поверхности отстаивания от номинального эквивалентного диаметра частиц никелина и вмещающей породы в никелевой руде. Частицы, эквивалентный диаметр которых больше или равен полученному номинальному, полностью улавливаются. Показаны плотности распределения частиц никелина и вмещающей породы в никелевой руде и локальные пофракционные степени улавливания в отстойнике этих частиц при общей степени улавливания 90%, при этом номинальный размер осаждающихся частиц никелина в два раза меньше номинального размера всплывающих частиц вмещающей породы в никелевой руде. Полученные зависимости общей степени улавливания частиц никелевой руды и необходимой поверхности отстойника от номинального эквивалентного диаметра этих частиц показали, что для всплывающих частиц площадь отстойника должна быть на порядок выше площади отстойника для осаждающихся частиц. Предложенный алгоритм расчета позволяет подбирать геометрические параметры отстойника с заданной степенью улавливания частиц и может быть рекомендован для технологического расчета оборудования при гравитационном мокром методе разделения руды.

**Ключевые слова:** вероятность улавливания, плотность, вязкость, локальная и общая степени очистки, номинальный размер, поверхность отстойника, никелевые месторождения, вмещающая порода

© Голованчиков А.Б., Залипаева О.А., Прохоренко Н.А., Меренцов Н.А., 2024

### Для цитирования

Вероятность совместного улавливания тяжелых и легких частиц в отстойнике / Голованчиков А.Б., Залипаева О.А., Прохоренко Н.А., Меренцов Н.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №4. С. 50-59. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-50-59>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# PROBABILITY OF COMBINED CAPTURE OF HEAVY AND LIGHT PARTICLES IN A SETTLING TANK

Golovanchikov A.B., Zalipaeva O.A., Prokhorenko N.A., Merentsov N.A.

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

**Abstract.** Physical and mathematical modeling of gravitational separation of suspensions is carried out, in which density of fine particles is more and less than density of continuous liquid phase. Formulas are analytically derived for calculating local degrees of purification of particles whose sizes are greater than or equal to the nominal equivalent diameter, that is, 100% captured. An example of calculation is given with determination of the dependence of the overall degree of purification and settling surface on the nominal equivalent diameter of nickeline particles and host rock in nickel ore. Particles whose equivalent diameter is greater than or equal to the nominal diameter obtained are completely captured. The distribution densities of nickeline particles and host rock in nickel ore and local fractional degrees of capture of these particles in the settling tank are shown with a total capture degree of 90%, while the nominal size of the settling nickeline particles is two times smaller than the nominal size of the floating particles of host rock in nickel ore. The obtained dependencies of the total degree of capture of nickel ore particles and the required surface of the settling tank on the nominal equivalent diameter of these particles showed that for floating particles the area of the settling tank should be an order of magnitude higher than the area of the settling tank for precipitating particles. The proposed calculation algorithm allows to select geometric parameters of the settling tank with the specified degree of particles capture and can be recommended for technological calculation of equipment at gravitational wet method of ore separation.

**Keywords:** probability of capture, density, viscosity, local and total degree of purification, nominal size, settling tank surface, nickel deposits, host rock

## For citation

Golovanchikov A.B., Zalipaeva O.A., Prokhorenko N.A., Merentsov N.A. Probability of Combined Capture of Heavy and Light Particles in a Settling Tank. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 4, pp. 50-59. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-50-59>

## Введение

Метод мокрого гравитационного разделения частиц дисперсной фазы от сплошной жидкой фазы основан на условии, что плотность дисперсной фазы больше плотности сплошной фазы, в которой частицы осаждаются на дне отстойника или каждой полки [1, 2]. Обычно, с точки зрения экономической целесообразности, в качестве сплошной фазы при мокром гравитационном разделении используют воду. Однако при переработке лома цветных металлов и аккумуляторного лома в качестве сплошной фазы используется тяжелая суспензия с плотностью  $\rho = 3150 \text{ кг/м}^3$ . В качестве утяжелителей тяжелой суспензии при переработке аккумуляторного лома используются тонкодисперсные соединения сульфатно-окисного свинца, которые выделяют из исходного сырья путем последовательного осуществления ряда технологических операций [3]. Метод мокрого гравитационного отделения рудных минералов от минералов вмещающей породы в тяжелой суспензии применяется на обогатительных предприятиях [4-6]. В практике обогащения руд в качестве утяжелителей используются тонко измельченный магнетит, глина, песок, ферросилиций и другие утяжелители суспензий. Неметаллическая легкая масса вмещающей породы, всплывающая на поверхность тяжелой суспензии, также является полезным продуктом, так как после очистки мо-

жет быть использована в качестве наполнителя буровых и тампонажных растворов при бурении нефтяных и газовых скважин. Такой вмещающей породой для никелевой руды является кварцево-карбонатная порода, которая может быть использована для приготовления буровых растворов при вскрытии продуктивных пластов. Легкие компоненты вмещающей породы также могут быть использованы в качестве модификатора для повышения спекающей способности при изготовлении каменноугольных брикетов [3]. От физических и химических параметров сплошной и дисперсной фаз зависит эффективность гравитационного разделения руд [7-9].

Кроме того, для совместного улавливания тяжелых и легких частиц в отстойнике в качестве сплошной фазы рекомендуется использовать тяжелые жидкости, в которых легкие частицы любых размеров всплывают и их извлечение не требует дополнительных технологических операций (сепарирования и т.п.). К таким тяжелым жидкостям относится бромформ с температурой плавления  $+8^\circ\text{C}$  [10]. Использование при гравитационном разделении руд в качестве сплошной фазы тяжелой жидкости имеет ряд преимуществ, так как из вмещающей породы получается целевой продукт, не требующий очистки.

В цветной металлургии ежегодно образуется около 10 млн т шлаков, уровень переработки которых не

превышает 15%. При выплавке 1 т меди образуется до 30 т шлаков, а при выплавке 1 т никеля – до 150 т шлаков [3]. Из-за сложности технологических процессов переработки основная их часть направляется в отвалы на временное хранение с перспективой их обогащения после разработки новых экономически выгодных способов извлечения целевых металлов.

Целью работы является физическое и математическое моделирование совместного гравитационного разделения суспензий в отстойнике, у которых плотность тонкодисперсных частиц больше и меньше плотности сплошной жидкой фазы. То же касается обогащения бедных руд цветных, благородных и редких металлов, а также техногенного сырья – шлаков и шламов металлургических заводов, шламов обогатительных фабрик, аккумуляторного лома и т.п.

**Вывод формул для локальной степени улавливания тяжелых и легких частиц в отстойнике**

Рассмотрим горизонтальное одномерное движение тяжелой и вязкой жидкости в коридоре отстойника шириной  $b$ , длиной  $l$  и высотой  $H$  со свободной границей (рис. 1).

Из уравнения движения вязкой жидкости Навье-Стокса [1]

$$\frac{\partial v_x}{\partial \tau} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right),$$

где  $v_x, v_x, v_x$  – вектора скорости частиц жидкости, м/с;

$\frac{\partial v_x}{\partial \tau}$  – ускорение по оси  $x$ , м/с<sup>2</sup>;

$\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$\nu = \mu/\rho$  – кинематическая вязкость жидкости, м<sup>2</sup>/с;  
 $p$  – давление в аппарате, Па,

для стационарного одномерного движения получаем

$$\frac{\partial v_x}{\partial \tau} = 0; v_y = 0; v_z = 0.$$

Тогда

$$\frac{dp}{dx} = \mu \frac{d^2 v_x}{dz^2}, \tag{1}$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость жидкости, Па·с.

Градиент давления – величина постоянная, то есть  $\frac{dp}{dx} = -\frac{\Delta p}{l}$ ,

$$\frac{\Delta p}{l} = -\mu \frac{d^2 v_x}{dz^2}, \tag{2}$$

где  $\Delta p$  – разница давлений на входе  $p_0$  и на выходе  $p_l$  из отстойника.

Из реологического уравнения Ньютона для вязкой жидкости [11]

$$\tau = -\mu \frac{dv_x}{dz} \tag{3}$$

после алгебраических преобразований уравнений (1)–(3) получаем

$$\frac{\Delta p}{l} = -\frac{d\tau}{dz} \tag{4}$$

с граничным условием на свободной поверхности

$$z = H \quad \tau = 0. \tag{5}$$

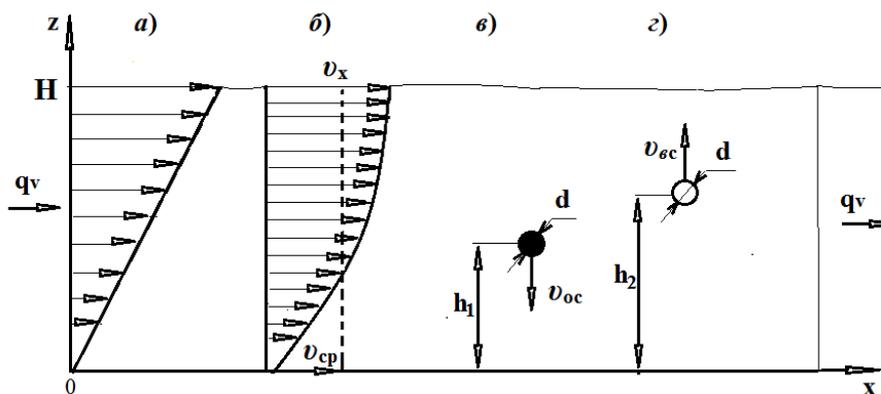


Рис. 1. Одномерное течение тяжелой вязкой жидкости в отстойнике со свободной границей: а – эпюра касательных напряжений; б – профиль скорости; в – осаждение частицы, плотность которой больше плотности тяжелой жидкости; г – всплывание частицы, плотность которой меньше плотности тяжелой жидкости

Fig. 1. One-dimensional flow of a heavy viscous liquid in a settling tank with a free boundary a) a plot of tangential stresses; б) speed profile; в) precipitation of a particle whose density is greater than the density of a heavy liquid; г) the floating of a particle whose density is less than the density of a heavy liquid

Тогда после интегрирования (4) с учетом (5) получаем формулу для линейности эпюры касательных напряжений (рис. 1, а):

$$\tau = \frac{\Delta p}{l}(H - z). \quad (6)$$

Последовательно дважды проинтегрируем уравнение движения (1) с учетом (2). Тогда

$$v_x = -\frac{1}{\mu} \frac{\Delta p}{l} \frac{z^2}{2} + P_1 z + P_2,$$

где  $P_1$  и  $P_2$  – постоянные интегрирования, определяемые из граничных условий (рис. 1, б);

$z = H$ ,  $\frac{dv_x}{dz} = 0$  – отсутствие градиента скорости на свободной границе.

С учетом граничных условий

$$v_x = \frac{1}{\mu} \frac{\Delta p}{l} \left( Hz - \frac{z^2}{2} \right). \quad (7)$$

Рассмотрим процесс осаждения частиц, плотность которых больше плотности тяжелой жидкости.

Улавливание частиц подчиняется основному условию: время пребывания больше или равно времени осаждения. Для частиц номинального эквивалентного диаметра  $d_0$  в пределе улавливание происходит на 100%.

$$\frac{l}{v_{cp}} = \frac{H}{v_{oc}}. \quad (8)$$

Определим связь между объемным расходом жидкости  $q_v$  и перепадом давления  $\Delta p$ . Элементарный расход на высоте  $z$  толщиной  $dz$  запишется в виде  $dq_v = b v_x dz$  или с учетом формулы (7):

$$dq_v = b \frac{1}{\mu} \frac{\Delta p}{l} \left( Hz - \frac{z^2}{2} \right) dz,$$

где  $b$  – ширина коридора отстойника.

После интегрирования полученного уравнения от нуля до  $H$

$$q_v = \frac{b}{\mu} \frac{\Delta p}{l} \left( \frac{H^3}{3} \right).$$

Свяжем среднюю скорость с объемной производительностью (уравнение неразрывности):

$$q_v = b H v_{cp}.$$

Тогда из совместного решения последних двух уравнений получаем

$$\frac{\Delta p}{l} = \frac{3\mu}{H^2} v_{cp}.$$

Подставляя полученное значение  $\Delta p/l$  в уравнение (7), приходим к формуле зависимости текущей скорости  $v_x$  от средней  $v_{cp}$ :

$$v_x = 3v_{cp} \left[ \left( \frac{z}{H} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{z}{H} \right)^2 \right]. \quad (9)$$

При  $z = H$   $v_x = 1,5v_{cp}$ , то есть скорость на свободной границе в 1,5 раза больше средней.

Из уравнения (8) несложно получить известное уравнение для поверхности отстойника, в котором улавливаются частицы номинального диаметра  $d_0$ , то есть частицы, успевающие осесть на дно отстойника с самой неблагоприятной траектории при  $z = H$ , когда время осаждения наибольшее.

Домножим числитель и знаменатель левой и правой частей на ширину коридора отстойника  $b$ . Тогда поверхность дна отстойника, на которую осаждаются эти частицы,

$$F = l \cdot b,$$

и с учетом уравнения (8)

$$F = \frac{q_v}{v_o}, \quad (10)$$

где  $v_o$  – скорость осаждения частиц номинального эквивалентного диаметра  $d_0$ .

То есть частицы фракционного состава больше или равные  $d_0$  теоретически улавливаются при осаждении на 100%.

Определим высоту траектории  $h < H$  для частиц, диаметр которых меньше диаметра частиц номинального эквивалентного диаметра  $d < d_0$ , но которые с этой траектории успевают осесть на дно отстойника.

Из дифференциального уравнения улавливания этих частиц по времени осаждения и пребывания  $d\tau_{np} = d\tau_{oc}$  получаем

$$\frac{dx}{v_x} = \frac{dz}{v_{oc}}, \quad (11)$$

где  $v_{oc}$  – скорость осаждения частиц диаметром  $d < d_0$ .

После разделения переменных с учетом значения  $v_x$  из уравнения (9) получаем

$$v_{oc} dx = 3v_{cp} \left[ \left( \frac{z}{h} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{z}{h} \right)^2 \right] dz.$$

Интегрируя слева от 0 до  $l$ , а справа от 0 до  $h$ , приходим к формуле

$$v_{oc} l = 3v_{cp} H \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{h}{H} \right)^2 - \frac{1}{6} \left( \frac{h}{H} \right)^3 \right].$$

Полагая, что частицы любого фракционного состава  $d$  равномерно распределены по объему суспензии и обозначая степень улавливания  $\chi = \frac{h}{H}$ , получаем формулу для локальной степени улавливания частиц диаметра  $d < d_0$ :

$$1,5\chi^2 - 0,5\chi^3 = \left(\frac{v_{oc}}{v_{cp}}\right) \frac{l}{H}. \quad (12)$$

При  $\chi = 1$ ,  $d = d_0$ ,  $v_{oc} = v_0$ , то есть частицы номинального эквивалентного диаметра (и больше) улавливаются на 100% даже с самой неблагоприятной верхней траектории  $h = H$ .

Тогда последнее уравнение принимает вид

$$1 = \frac{v_0}{v_{cp}} \frac{l}{H}. \quad (13)$$

Делим левые и правые части уравнения (12) на соответствующие части уравнения (13) и получаем формулу для локальной степени улавливания частиц диаметром  $d < d_0$ :

$$1,5\chi^2 - 0,5\chi^3 = \frac{v_{oc}}{v_0}. \quad (14)$$

Для ламинарного режима осаждения тонкодисперсных суспензий и эмульсий, скорость осаждения которых подчиняется закону Стокса, последнее уравнение упрощается:

$$1,5\chi^2 - 0,5\chi^3 = \left(\frac{d}{d_0}\right)^2. \quad (15)$$

Уравнения (14) и (15) приведены без выводов в учебном пособии [12], а программа для расчета отстойника с учетом этих уравнений представлена в свидетельстве о государственной регистрации программы на ЭВМ [13]. Однако для частиц, всплывающих в тяжелой жидкости, когда ее плотность больше плотности дисперсной фазы, такого уравнения не было выведено.

Ниже приводится вывод этой формулы.

Профиль скорости сплошной фазы – тяжелой вязкой жидкости, в которой всплывают легкие частицы, описывается уравнением (9) (рис. 1, б).

В уравнении (8) скорость осаждения заменяется на время всплывания:

$$\frac{l}{v_{cp}} = \frac{H}{v_{bc}}.$$

Аналогичное изменение касается уравнения (11):

$$\frac{dx}{v_x} = \frac{dz}{v_{bc}}. \quad (16)$$

После подстановки в уравнение (16) значения скорости  $v_x$  из уравнения (9) получаем

$$v_{bc} dx = 3v_{cp} \left[ \left(\frac{z}{H}\right) - \frac{1}{2} \left(\frac{z}{H}\right)^2 \right] dz.$$

Частицы с диаметром  $d$  меньше номинального  $d_0$  (успевающих всплыть со дна отстойника при  $z = 0$  и улавливаемых на поверхности тяжелой жидкости при  $z = H$  на 100%) успевают всплыть с траектории  $z = h$  (рис. 1, в).

Подставляем обозначенные пределы интегрирования в правую часть последнего уравнения и после алгебраических преобразований получаем

$$v_{bc} \ell = v_{cp} H \left[ -1,5 \left(\frac{h}{H}\right)^2 + 0,5 \left(\frac{h}{H}\right)^3 + 1 \right]. \quad (17)$$

Полагаем, как и для осаждающихся частиц, что для всплывающих частиц любого фракционного состава с диаметром  $d < d_0$  они на входе в отстойник равномерно распределены по объему.

Тогда локальная степень улавливания легких частиц

$$\chi = \frac{H-h}{H}, \quad (18)$$

и уравнение (17) приводится к виду

$$1 + 0,5(1-\chi)^3 - 1,5(1-\chi)^2 = \frac{v_{bc} l}{v_{cp} H}. \quad (19)$$

При  $\chi = 1$ ,  $d = d_0$ ,  $v_{bc} = v_0$  и уравнение (19) принимает вид

$$1 = \frac{v_0 l}{v_{cp} H}.$$

Делим левую и правую части уравнения (19) на соответствующие части последнего равенства. Получаем уравнение для локальной степени очистки улавливания всплывающих частиц, плотность которых меньше плотности тяжелой жидкости:

$$1 + 0,5(1-\chi)^3 - 1,5(1-\chi)^2 = \frac{v_{bc}}{v_0}. \quad (20)$$

Для тонкодисперсного фракционного состава, скорость частиц которых подчиняется закону Стокса, уравнение (20) упрощается до вида

$$1 + 0,5(1-\chi)^3 - 1,5(1-\chi)^2 = \left(\frac{d}{d_0}\right)^2. \quad (21)$$

Для сравнения графики локальных степеней улавливания всплывающих и осаждающихся частиц с диаметром меньше номинального  $d < d_0$  как функции

относительных скоростей соответственно их всплывания и осаждения приведены на рис. 2.

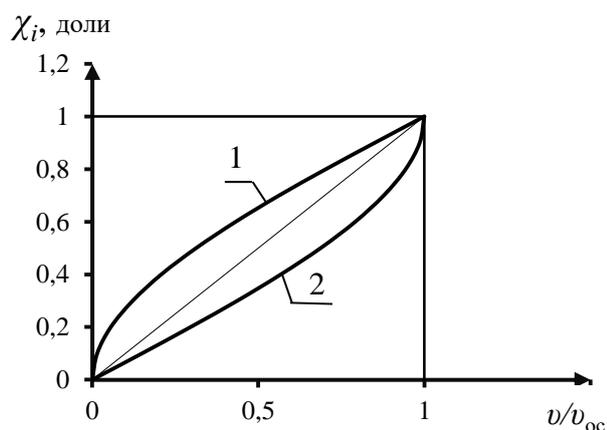


Рис. 2. Зависимость локальной степени улавливания частиц диаметром меньше номинального от относительной скорости осаждения (1) или всплывания (2) (формулы (14) и (20),  $i=1$  – осаждение,  $i=2$  – всплывание)

Fig. 2. Dependence of the local degree of capture of particles with a diameter less than the nominal one on the relative deposition rate (1) or ascent (2), formulas (14) and (20),  $i=1$  is deposition,  $i=2$  is ascen

**Пример расчета совместного отделения никелина и вмещающей породы в тяжелой жидкости с использованием полученных уравнений (14) и (20).** Никелевые руды – это минеральные агрегаты в форме сернистых, мышьяковых и кремнекислых соединений. Например, никелин – красный никелевый колчедан NiAs с плотностью  $\rho_{m1} = 7600-7800$  кг/м<sup>3</sup> содержится в кварцево-карбонатных рудных породах с плотностью  $\rho_{m2} = 2800$  кг/м<sup>3</sup> [14]. Выбираем в качестве сплошной фазы тяжелую жидкость – бромформ с плотностью  $\rho_{m2} = 2900$  кг/м<sup>3</sup> и вязкостью  $\mu = 2,35 \cdot 10^{-3}$  Па·с [10, 15], применяемый для гравитационного разделения суспензий [15, 16].

Таблица 1. Распределение частиц никелина по фракциям  
Table 1. Distribution of nickel particles by fractions

Номер фракции	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	$\Sigma$
Диаметр $d$ , мкм	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72	78	84	90	
Масса $\Sigma G$ , г	5	25	55	84	91	87	75	60	48	35	26	18	11	7	2	629

Таблица 2. Распределение частиц вмещающей породы по фракциям  
Table 2. Distribution of particles of host rock by fractions

Номер фракции	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	$\Sigma$
Диаметр $d$ , мкм	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	
Масса $\Sigma G$ , г	13	48	76	85	83	72	60	50	40	30	22	15	9	5	2	610

Распределение частиц никелина и вмещающей породы после измельчения представлено в табл. 1 и 2.

Ниже приведены основные формулы алгоритма расчета [12].

1. Для заданного размера фракции  $d$  определяется число Архимеда:

$$Ar = \frac{gd^3|\Delta\rho|\rho}{18\mu},$$

где  $\Delta\rho_i = \rho_{mi} - \rho$ ,  $i = 1, 2$ .

2. Определяется число Рейнольдса:

$$Re = \frac{Ar}{18 + 0,575\sqrt{Ar}}.$$

3. Определяется скорость осаждения частиц никелина или всплывания частиц вмещающей породы:

$$v = \frac{\mu Re}{\rho d},$$

где  $v = v_{ос}$  или  $v_{вс}$ .

4. Выбирается диаметр номинальных частиц  $d_0$ , улавливаемых (оседающих на дно отстойника или всплывающих на поверхность тяжелой жидкости) на 100%. Номинальный диаметр варьируется с подбором для заданной степени улавливания [13].

5. Для фракции  $d_i \leq d_0$  рассчитываются локальные степени улавливания  $\chi_i$  по формуле (14) для оседающих частиц никелина ( $\rho_{m1} > \rho$ ) или для всплывающих частиц вмещающей породы ( $\rho_{m2} < \rho$ ) по формуле (20).

6. Определяется поверхность отстойника для заданных диаметров частиц никелина и частиц вмещающей породы по формуле

$$F_i = \frac{q_v}{v_{oi}},$$

где  $i = 1, 2$  ( $i = 1$  – для оседающих частиц,  $i = 2$  – для всплывающих частиц).

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 показана зависимость локальной степени улавливания частиц диаметром  $d_i \leq d_0$  от относительной скорости осаждения или всплывания, меньшей, чем соответственно скорость осаждения  $v_{ос}$  осаждающихся или всплывающих частиц:

- 1 – для осаждающихся частиц с плотностью  $\rho_{m1} > \rho$ ;
- 2 – для всплывающих частиц с плотностью  $\rho_{m2} < \rho$ .

На рис. 3 и 4 показаны плотности распределения частиц никелина и вмещающей породы в никелевой руде, а также локальные пофракционные степени улавливания в отстойнике этих частиц при общей степени улавливания  $\sum \chi_i = 90\%$ , области уловленных

частиц никелина и частиц вмещающей породы заштрихованы.

Как видно из рис. 3 и 4, номинальный размер осаждающихся частиц никелина  $d_{01} = 28,5$  мкм, а номинальный размер всплывающих частиц вмещающей породы в никелевой руде  $d_{02} = 61,5$  мкм. Частицы больше полученных номинальных диаметров  $d_0$  полностью улавливаются.

На рис. 5 и 6 показаны номограммы зависимостей общей степени улавливания частиц никелина и разделения частиц вмещающей породы никелевой руды, а также необходимой поверхности отстойника от диаметра этих частиц.

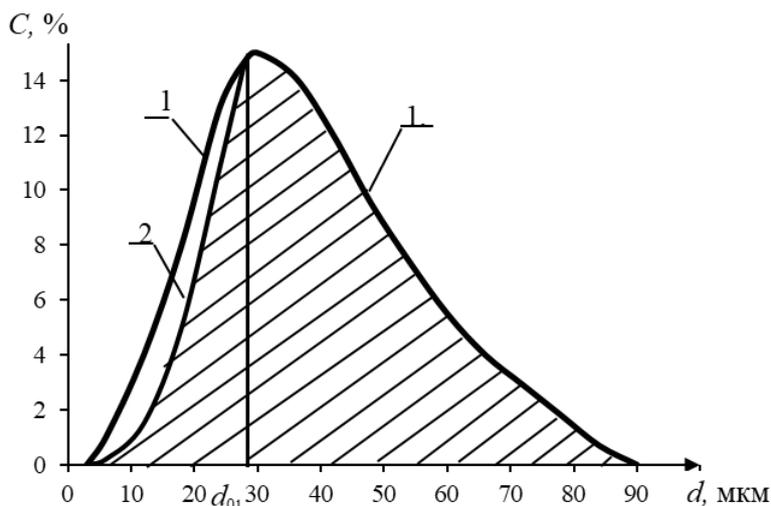


Рис. 3. Плотность распределения никелина по фракциям (1) и локальные пофракционные степени улавливания в отстойнике этих частиц

Fig. 3. Distribution density of nickeline by fractions (1) and local fractional degrees of capture of these particles in the settling tank

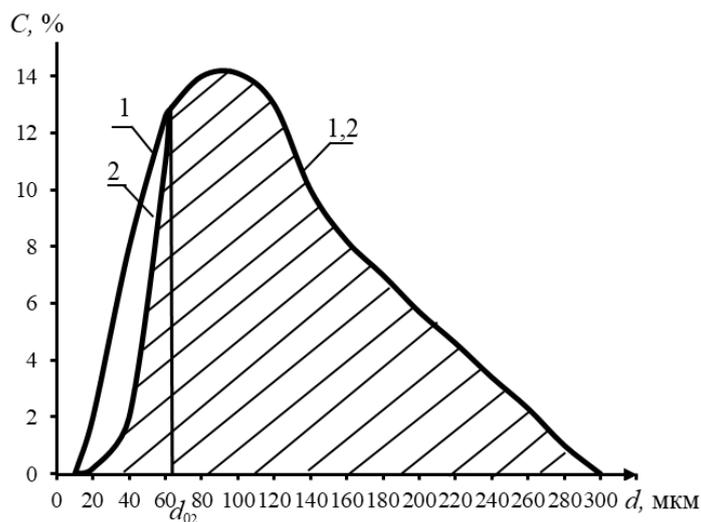


Рис. 4. Плотность распределения частиц вмещающей породы в никелевой руде и локальные пофракционные степени улавливания в отстойнике этих частиц

Fig. 4. Distribution density of host rock particles in nickel ore and local fractional degrees of capture of these particles in a settling tank

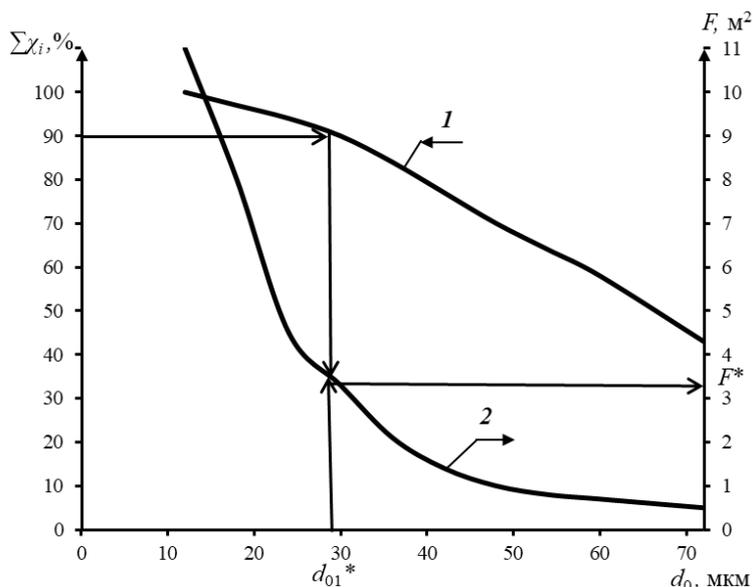


Рис. 5. Номограмма зависимости общей степени улавливания частиц никелина (1) и необходимой поверхности отстойника (2) от номинального диаметра этих частиц

Fig. 5. Nomogram of the dependence of the total degree of capture of nickeline particles (1) and the required surface of the settling tank (2) on the nominal diameter of these particles

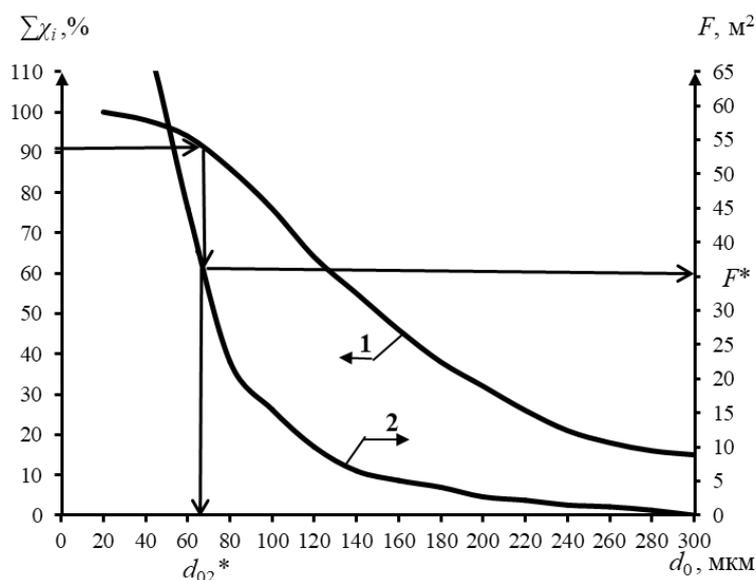


Рис. 6. Номограмма зависимости общей степени разделения частиц вмещающей породы от никелевой руды (1) и необходимой поверхности отстойника (2) от номинального диаметра этих частиц

Fig. 6. Nomogram of the dependence of the overall degree of separation of particles of the host rock from nickel ore (1) and the required surface of the settling tank (2) on the nominal diameter of these particles

На рис. 5 показана схема с определением номинального диаметра  $d_{01}^* = 28,5$  мкм и необходимой поверхности отстойника  $F^* = 3,16$  м<sup>2</sup> для общей степени улавливания 90% при осаждении частиц никелина в отстойнике. На рис. 6 показана схема с определением номинального диаметра частиц вмещающей породы от никелевой руды  $d_{02}^* = 61,5$  мкм и необходимой при этом поверхности отстойника  $F^* = 35,04$  м<sup>2</sup> также для общей степени улавливания 90% при всплывании этих частиц в отстойнике.

Как видно из приведенных графиков, для получения целевого продукта никелевой руды (никелина и т.п.) по заданным технологическим параметрам достаточно выбрать отстойник с поверхностью до 4 м<sup>2</sup>. Для улавливания частиц всплывающей вмещающей породы из никелевой руды необходимо подобрать отстойник со значительно большей рабочей поверхностью – не менее 35 м<sup>2</sup>.

**Заключение**

Таким образом, при технологическом расчете отстойника для разделения никелевой руды (совместного извлечения частиц никелина и вмещающей породы) при использовании полученных зависимостей можно получить необходимую поверхность отстойника, обеспечивающую необходимую степень очистки как по тяжелой, так и по легкой дисперсной фазе.

Приведенный алгоритм расчета позволяет подбирать геометрические параметры отстойника с заданной степенью улавливания частиц. Полученные закономерности и алгоритм расчета могут быть использованы для гравитационного разделения суспензий, у которых плотность частиц больше или меньше плотности сплошной тяжелой жидкой фазы, и применимы также для бедных руд, шламов обогатительных фабрик, шламов и шлаков металлургических заводов, когда имеется существенная разность в плотностях разделяемых частиц.

**Список источников**

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов. 14-е изд., стер. М.: Альянс, 2008. 750 с.
2. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учеб. пособие для студ. хим.-технолог. спец. вузов / под ред. П.Г. Романкова. 10-е изд., перераб. и доп. М.: Альянс, 2013. 576 с.
3. Тимонин А.С. Инженерно-экологический справочник. В 3 т. Т. 3. Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2003. 881 с.
4. Справочник по обогащению руд. Основные процессы / под ред. О. С. Богданова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1983. 381 с.
5. Полькин С.И. Обогащение руд и россыпей редких и благородных металлов: учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1987. 428 с.
6. Кравец Б.Н. Специальные и комбинированные методы обогащения: учебник по спец. «Обогащение полезных ископаемых». М.: Недра, 1986. 303 с.
7. Nzeh N.S. et al. Physical beneficiation of heavy minerals. Part 2: A state of the art literature review on gravity concentration techniques // Heliyon. 2023, vol. 9, no. 8, article e18919. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e18919.
8. Yongming G. et al. Ore Technical Characteristics and Ore Dressing Test of Low Grade Cu-Ni Ore in Huangshan Deposit, NW China // International journal of earth sciences. 2016, vol. 9, no. 5, pp. 1972-1978.
9. Ersoy B. et al. Descriptive Process Mineralogy to Evaluate Physical Enrichment Potential of Malatya/Kuluncak Rare Earth Ore through MLA // Minerals. 2023, vol. 13, no. 9, pp. 1197.
10. Бромформ. Паспорт вещества. International Labour Organization. World Health Organization, 2018.
11. Романков П.Г., Курочкина М.И. Гидромеханические процессы химической технологии. 2-е изд.,

перераб. и доп. Ленинград: Химия. Ленингр. отделение, 1974. 288 с.

12. Моделирование гидродинамических и биоэкологических процессов очистки многокомпонентных систем от дисперсной фазы: монография / А.Е. Новиков, А.Б. Голованчиков, Е.А. Дугин, М.И. Филимонов; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Волгоградский государственный технический университет. Волгоград: ВолгГТУ, 2019. 198 с.
13. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2018613319 от 7 марта 2018 г. Российская Федерация. Программа для расчёта основных технологических параметров процесса разделения суспензий и эмульсий в отстойнике / А.Б. Голованчиков, П.С. Васильев, Минь Кьонг Доан, М.И. Филимонов; ВолгГТУ. 2018.
14. Большая советская энциклопедия. Т. 29. Никелевые руды / под ред. Б.А. Введенского. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Гос. науч. изд. «Большая советская энциклопедия», 1954. 627 с.
15. Abdel-Karim A.A.M., Barakat M.G. Separation, upgrading, and mineralogy of placer magnetite in the black sands, northern coast of Egypt // Arabian Journal of Geosciences. 2017, vol. 10, pp. 1-17.
16. Matveev A. et al. Possibility of implementation of dry technology of gold-bearing ores roughing: case study of “Gurbey” deposit // E3S Web of Conferences. EDP Sciences. 2018, vol. 56, pp. 3012.

**References**

1. Kasatkin A.G. *Osnovnye processy i apparaty himicheskoy tekhnologii: uchebnik dlya vuzov*. [The main processes and devices of chemical technology: Textbook for universities]. 14th ed., revised. Moscow: Alliance, 2008, 750 p.
2. Pavlov K.F., Romankov P.G., Noskov A.A. *Primery i zadachi po kursu processov i apparatov himicheskoy tekhnologii: ucheb. posobie dlya stud. him.-tekhnolog. spec. vuzov*. [Examples and tasks on the course of processes and apparatuses of chemical technology: Textbook for students of chemical and technological specialties of universities]. Ed. by P. G. Romankova, 10th ed., revised and add. Moscow: Alliance, 2013, 576 p.
3. Timonin A.S. *Inzhenerno-ekologicheskij spravochnik*. [Engineering and Environmental Handbook]. Vol. 3. Kaluga: N. Bochkareva Publishing House, 2003, 881 p.
4. *Spravochnik po obogashcheniyu rud. Osnovnye processy*. [Reference book for ore dressing. Main processes]. Ed. by O.S. Bogdanov, 2nd ed., revised and supplemented. Moscow: Nedra, 1983, 381 p.
5. Polkin S.I. *Obogashchenie rud i rossypej redkih i blagorodnyh metallov: uchebnik dlya vuzov*. [Enrichment of ores and placers of rare and noble metals: Textbook for universities]. 2nd ed., revised and add. Moscow: Nedra, 1987, 428 p.
6. Kravets B.N. *Special'nye i kombinirovannye metody obogashcheniya: uchebnik po spec. "Obogashchenie*

- poleznyh iskopaemyh*". [Special and combined enrichment methods: Textbook on the specialty "Mineral processing"]. Moscow: Nedra, 1986, 303 p.
7. Nzeh N.S. et al. Physical beneficiation of heavy minerals – Part 2: A state of the art literature review on gravity concentration techniques. *Heliyon*. 2023;9(8). Article e18919. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e18919.
  8. Yongming G. et al. Ore Technical Characteristics and Ore Dressing Test of Low Grade Cu-Ni Ore in Huangshan Deposit, NW China. *International journal of earth sciences*. 2016;9(5):1972-1978.
  9. Ersoy B. et al. Descriptive Process Mineralogy to Evaluate Physical Enrichment Potential of Malatya/Kuluncak Rare Earth Ore through MLA. *Minerals*. 2023;13(9):1197.
  10. Bromoform. Substance passport. International Labour Organization. Word Health Organization, 2018.
  11. Romankov P.G., Kurochkina M.I. *Gidromekhanicheskie processy himicheskoy tekhnologii*. [Hydromechanical processes of chemical technology]. 2nd ed., revised and add. Leningrad: Khimiya. Leningradskoye otdeleniye, 1974, 288 p.
  12. Novikov A.E., Golovanchikov A.B., Dugin E.A., Filimonov M.I. *Modelirovanie gidrodinamicheskikh i bioekologicheskikh processov ochistki mnogokomponentnykh sistem ot dispersnoy fazy: monografiya*. [Modeling of hydrodynamic and bioecological processes of cleaning multicomponent systems from a dispersed phase: monograph]. Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Volgograd State Technical University. Volgograd: Volgograd State Technical University, 2019, 198 p.
  13. Golovanchikov A.B., Vasiliev P.S., Min Kyong Doan, Filimonov M.I. *Programma dlya raschyota osnovnykh tekhnologicheskikh parametrov processa razdeleniya suspenzij i emul'sij v otstojnike*. [Program for calculating the main technological parameters of the process of separation of suspensions and emulsions in a settling tank]. Certificate of state registration of a computer program RF, no. 2018613319, 2018.
  14. *Bol'shaya sovetskaya enciklopediya*. T. 29. *Nikelevye rudy* [Great Soviet Encyclopedia. Vol. 29. Nickel ores]. Ed. By B.A. Vvedensky, 2nd ed., revised and supplemented. Moscow: State Scientific Publishing House "Great Soviet Encyclopedia", 1954, 627 p.
  15. Abdel-Karim A.A.M., Barakat M.G. Separation, upgrading, and mineralogy of placer magnetite in the black sands, northern coast of Egypt. *Arabian Journal of Geosciences*. 2017;10:1-17.
  16. Matveev A. et al. Possibility of implementation of dry technology of gold-bearing ores roughing: case study of "Gurbey" deposit. *E3S Web of Conferences*. *EDP Sciences*, 2018;56:3012.

Поступила 14.04.2024; принята к публикации 19.04.2024; опубликована 24.12.2024  
Submitted 14/04/2024; revised 19/04/2024; published 24/12/2024

**Голованчиков Александр Борисович** – доктор технических наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия.  
Email: pahp@vstu.ru. ORCID 0000-0002-4576-4229

**Залипаева Ольга Александровна** – кандидат технических наук, доцент, Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия.  
Email: zalipaevaolga@yandex.ru. ORCID 0000-0002-9345-2625

**Прохоренко Наталья Андреевна** – кандидат технических наук, старший преподаватель, Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия.  
Email: natasha292009@yandex.ru. ORCID 0000-0002-5706-1475

**Меренцов Николай Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент, Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия.  
Email: steeples@mail.ru. ORCID 0000-0002-6579-2630

**Alexander B. Golovanchikov** – DrSc (Eng.), Professor, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia.  
Email: pahp@vstu.ru. ORCID 0000-0002-4576-4229

**Olga A. Zalipaeva** – PhD (Eng.), Associate Professor, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia.  
Email: zalipaevaolga@yandex.ru. ORCID 0000-0002-9345-2625

**Natalia A. Prokhorenko** – PhD (Eng.), Senior lecturer, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia.  
Email: natasha292009@yandex.ru. ORCID 0000-0002-5706-1475

**Nikolay A. Merentsov** – PhD (Eng.), Associate Professor, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia.  
Email: steeples@mail.ru. ORCID 0000-0002-6579-2630